E-ISSN: 2676-6159 | P-ISSN: 2538-5079

Journal of Decisions and Operations Research

www.journal-dmor.ir

J. Decis. Oper. Res. Vol. 6, No. 4 (2022) 518-535.

Paper Type: Original Article

Bi-Objective Model for Determining Optimal Machining Time in a Single Machine Robotic Cell by Considering the Stochastic Lifespan of the Tool

Leila Hasan-Beigi Dashtbayaz [1], Isa Nakhai Kamalabadi[2], Ali Husseinzadeh Kashan[1,*], Sakine Beigi[3]

[1] *Department of Industrial Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran; l.hasanbeigi@modares.ac.ir.*
[2] *Department of Industrial Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran; nakhaikamalabadi.i@wtiau.ac.ir.*
[1] *Department of Industrial Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran; a.kashan@modares.ac.ir.*
[3] *Deparment of Industrial Engineering, Kosar university of Bojnord, Bojnord, Iran; sakinebeigi@yahoo.com.*

Citation:

Hasan-Beigi Dashtbayaz, L., Nakhai Kamalabadi, I., Husseinzadeh Kashan, A., & Beigi, S. (2022). Bi-objective model for determining optimal machining time in a single machine robotic cell by considering the stochastic lifespan of the tool. *Journal of decisions and operations research*, *6*(4), 518-535.

Received: 26/04/2021 Reviewed: 12/06/2021 Revised: 07/07/2021 Accept: 15/0/2021

Abstract

Purpose: In CNC machines, changes in machining conditions such as speed and feed rate will also change the operating time. Changes in these conditions also result in changes in the production cycle time and production costs. Tool life is also sensitive to these changes. Appropriate machining time is generally determined by assuming a certain lifetime for CNC machine tools to minimize production costs. However, minimizing costs usually results in increased machining time and lower output rates.

Methodology: In this research, the optimal machining time is determined using a bi-objective model including minimizing the cost and total production time of a robotic cell with a CNC machine and a material handling robot. It has assumed that identical productions are produced in this robotic cell. Using the Epsilon constraint method, the proposed model is coded in GAMS software and its results are reported.

Findings: In this research, the lifespan of the CNC machine tools can be considered as a determined or probable value. The results showed that decreasing the operation time at different speeds does not necessarily impose the same cost on the system. Therefore, it is necessary to be more careful in choosing the appropriate machining time for different tools and parts. Paying attention to the rate of suddenly tool breakdowns is also important in choosing the appropriate time for machining. Using a set of non-dominated solutions, it is possible to determine the appropriate machining time in different parts to achieve a suitable level of problem objectives.

Originality/Value: In this research, for the first time, the failure rate of the tool as one of the cost factors in the robotic cell has been added to the cost function of a production cycle and its effect on determining the appropriate machining time has been investigated.

Keywords: Single machine robotic cell, CNC machines, Two-objective optimization.

Corresponding Author: a.kashan@modares.ac.ir
10.22105/DMOR.2021.274589.1328

Journal of Decisions and Operations Research

تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات

دوره ۶، شماره ۴، (۱۴۰۰)، ۵۳۵-۵۱۸

www.journal-dmor.ir

نوع مقاله: پژوهشی

مدل دوهدفه تعیین مدت‌زمان بهینه ماشین‌کاری در سلول رباتیک یک ماشینه با در نظر گرفتن طول عمر غیرقطعی ابزار

لیلا حسن بیگی دشت بیاض[۱]، عیسی نخعی کمال آبادی[۲]، علی حسین زاده کاشان[۱،*]، سکینه بیگی[۳]

[۱]گروه مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

[۲]گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

[۱]گروه مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

[۳]گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کوثر بجنورد، بجنورد، ایران.

چکیده

هدف: در ماشین‌آلات CNC با تغییر در شرایط ماشین‌کاری مانند سرعت و نرخ تغذیه، مدت‌زمان عملیات نیز تغییر خواهد کرد. تغییر در این شرایط همچنین منجر به تغییر در زمان سیکل تولیدی و هزینه‌های تولید می‌شود. طول عمر ابزار نیز نسبت به این تغییرات حساس است. مدت‌زمان مناسب ماشین‌کاری عموماً با فرض معین بودن طول عمر ابزار و با هدف حداقل نمودن هزینه‌های تولید تعیین می‌شود. حال‌آنکه حداقل نمودن هزینه‌ها معمولاً منجر به افزایش زمان ماشین‌کاری و کاهش نرخ خروجی می‌شود.

روش‌شناسی پژوهش: در این تحقیق، مدت‌زمان بهینه ماشین‌کاری با استفاده از یک مدل دوهدفه شامل حداقل نمودن هزینه و زمان سیکل تولیدی در یک سلول رباتیک یک‌ماشینه شامل یک ماشین CNC و یک ربات جابه‌جا کننده، برای تولید قطعات یکسان معرفی شده است. مدل پیشنهادی تحقیق با استفاده از روش محدودیت اپسیلون در نرم‌افزار گمز کدنویسی و نتایج آن گزارش شده است.

یافته‌ها: مسئله این تحقیق در دو حالت طول عمر معین و احتمالی ابزار مدل‌سازی و حل شده است. نتایج نشان داد که کاهش مدت‌زمان عملیات در سرعت‌های متفاوت لزوماً افزایش هزینه یکسانی را به سیستم تحمیل نمی‌کند؛ بنابراین باید در انتخاب مدت‌زمان مناسب ماشین‌کاری برای ابزارها و قطعه‌های متفاوت دقت بیشتری نمود. توجه به نرخ وقوع شکست‌های ناگهانی نیز در انتخاب زمان مناسب برای ماشین‌کاری اهمیت دارد.

اصالت/ارزش‌افزوده علمی: در این تحقیق، برای نخستین بار نرخ وقوع خرابی ابزار به‌عنوان یکی از عوامل ایجاد هزینه در سلول رباتیک به تابع هزینه یک سیکل تولیدی اضافه شده است و تأثیر آن بر تعیین مدت‌زمان مناسب ماشین‌کاری بررسی شده است.

کلیدواژه‌ها: سلول رباتیک یک ماشینه، ماشین‌آلات CNC، بهینه‌سازی دو هدفه.

* نویسنده مسئول

a.kashan@modares.ac.ir

10.22105/DMOR.2021.274589.1328

۱- مقدمه

امروزه سازمان‌های تولیدی در شرایط متفاوتی از گذشته قرار گرفته‌اند که ازجمله این شرایط می‌توان به افزایش فشارهای رقابتی، لزوم ایجاد تنوع در محصولات، تغییر در انتظارات مشتریان و افزایش سطح توقع مشتریان اشاره کرد (خراسانی و اسماعیلیان[1]، ۲۰۱۸). در این شرایط رقابتی، صنعت‌گران و تولیدکننده‌ها در تلاش‌اند تا با انعطاف‌پذیری در عملیات‌ها و فعالیت‌های خود، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری خواسته بخش‌های مختلف بازار را برآورده کنند و موقعیت خود را در بازار حفظ نمایند. برای دست‌یابی به این اهداف در بسیاری از صنایع تولیدی با هدف افزایش بهره‌وری سیستم‌های تولیدی از سلول‌های تولیدی انعطاف‌پذیر[2] استفاده می‌شود. در یک سلول تولیدی انعطاف‌پذیر، تعدادی ماشین *CNC* عمل ماشین‌کاری را بر روی قطعات انجام می‌دهند و یک یا چند ربات، قطعات را بین ماشین‌ها جابه‌جا می‌کنند. در این سلول‌ها، ماشین‌های *CNC* خود را با قطعات مختلف منطبق می‌کنند تا بتوانند با استفاده از ابزارهایی که بر روی مخزن ابزار ماشین تعبیه شده است، عملیات‌های موردنیاز برای تولید و تکمیل قطعات را انجام دهند (مرادی و همکاران[3]، ۲۰۱۸). ماشین‌آلات *CNC* موجود در سلول‌های رباتیک، بسیار انعطاف‌پذیرند. می‌توان از این قابلیت برای استفاده حداکثری از ظرفیت سلول‌ها استفاده نمود. توانایی تغییر در شرایط ماشین‌کاری این ماشین‌آلات مانند نرخ تغذیه و سرعت عملیات، مدت‌زمان عملیات را برای این ماشین‌ها قابل‌کنترل نموده است. فعالیت‌های ربات در سلول‌های رباتیک به دلیل طبیعت آن از نوع سیکلی است. ازاین‌رو حداقل کردن زمان سیکل تولیدی، يك معیار مهم در استفاده بهینه از سلول‌های رباتیک و زمان‌بندی فعالیت‌های آن‌ها خواهد بود. زمان سیکل تولیدی، میانگین زمان موردنیاز برای تولید يك قطعه در بلندمدت است به‌شرط آنکه هر فعالیت ربات به تعداد دفعات یکسان تکرار شود.

با توجه به هزینه‌های بالای استقرار این‌گونه سیستم‌های تولیدی، این سیستم‌ها باید به‌درستی مدیریت شوند تا علاوه بر حداکثر سازی نرخ تولید، هزینه تولید برای هر قطعه نیز حداقل شود. یکی از راه‌های کاهش هزینه‌ها و افزایش نرخ تولید در این سلول‌ها، تعیین مدت‌زمان مناسب ماشین‌کاری و توجه به طول عمر ابزار است. طول عمر ابزار در تحقیق‌های حوزه ماشین‌کاری به دو صورت معین و غیرقطعی در نظر گرفته شده است. تیلور[4] (۱۹۰۷) در تحقیق خود مدلی را برای تعیین طول عمر ابزار بر اساس سرعت ماشین‌کاری معین‌شده سیستم به دست آورده است. در مدل وی، ابزار پس از مدت‌زمان معینی تعویض می‌شود. در این صورت، طول عمر ابزار معین نامیده می‌شود. رامالینگام و واتسون[5] (۱۹۷۷) در تحقیق خود احتمال خرابی ابزار را در دو حالت، مستقل از زمان یا وابسته به زمان بررسی کرده‌اند. احتمال خرابی ابزار به دلیل وقوع اتفاق‌های پیش‌بینی‌نشده و یا وجود نقص در ساختار و شکل مواد، مستقل از زمان است. خرابی ابزار همچنین می‌تواند به دلیل فرسودگی رخ دهد که در این صورت تابع چگالی احتمال خرابی ابزار وابسته به زمان خواهد بود. در این دو حالت، طول عمر ابزار غیرقطعی است. فرسودگی ابزار و شکست‌های ناگهانی آن به دلیل فرسودگی، وقوع اتفاق‌های پیش‌بینی‌نشده و یا وجود نقص در ساختار و شکل مواد منجر به ایجاد هزینه در سیستم‌های تولیدی می‌شود.

در مطالعات قبلی، تحقیق‌های زیادی برای تعیین مدت‌زمان مناسب ماشین‌کاری در سلول‌های رباتیک انجام شده است. هر یک از این تحقیق‌ها از منظرهای متفاوتی از قبیل تعداد ماشین‌های *CNC* موجود در سلول رباتیک، انواع قطعات قابل تولید در سلول و نحوه برداشتن و گذاشتن قطعه توسط ربات از/بر روی ماشین به بررسی مسئله زمان‌بندی سلول رباتیک پرداخته‌اند. از منظر ابزار مورد استفاده در سلول‌های رباتیک، درحالی‌که بیشتر تمرکز تحقیق‌های گذشته بر نحوه تعویض ابزار در سلول‌های رباتیک چندماشینه برای کاهش هزینه و زمان تولید بوده است؛ به موضوع طول عمر غیرقطعی ابزار و تأثیر آن در تعیین زمان مناسب ماشین‌کاری پرداخته نشده است. علاوه بر این، هنگامی‌که طول عمر ابزار معین است، ابزار در زمان‌های از پیش تعیین‌شده‌ای تعویض می‌شود. متوسط زمان موردنیاز برای تعویض ابزار که تابعی از سرعت ماشین‌کاری است برای محاسبه زمان سیکل تولیدی در تحقیق‌های گذشته در نظر گرفته نشده است.

---

[1] Khorasani and Esmailian
[2] Flexible Manufacturing System (FMS)
[3] Moradi et al.
[4] Taylor
[5] Ramalingam and Watson

مسئله‌ای که در این تحقیق به آن پرداخته شده است تعیین مدت‌زمان مناسب برای هر عملیات در یک سلول رباتیک یک ماشینه با دو هدف کاهش هزینه‌ها و افزایش نرخ خروجی است. در سلول‌های رباتیک یک ماشینه، در هر سیکل تولیدی یک قطعه وارد سلول می‌شود و بعد از انجام عملیات تنها یک قطعه از سلول خارج می‌شود و در هر سیکل تولیدی، هر ماشین تنها یک‌بار بارگذاری می‌شود. ابزار استفاده‌شده در ماشین‌های *CNC* گاهی حساس به ضربه هستند (مانند ابزارهای با جنس کاربید) و با یک‌بار آسیب‌دیدگی دیگر قابل استفاده نیستند. همچنین درست نبستن گیره[1]، وجود فلش[2] در قطعه (مواد اضافی متصل به یک قطعه) و... می‌تواند باعث ایجاد ضربه‌هایی شود که منجر به خرابی ابزار شود. ساختار هندسی معیوب قطعات نیز می‌تواند منجر به خرابی در ابزار شود. معمولاً فرض می‌شود که احتمال رخ دادن چنین صدمه‌هایی در ابزار محدود اما ثابت باشد. توجه به نرخ وقوع خرابی‌های ابزار در انتخاب زمان مناسب برای ماشین‌کاری می‌تواند تأثیرگذار باشد. در تعدادی از تحقیق‌ها، تابع احتمال شکست ابزار مورد توجه قرار گرفته است درحالی‌که تأثیر این شکست بر هزینه‌های سیستم تولیدی و تأثیر آن بر زمان مناسب ماشین‌کاری نادیده گرفته شده است. در این تحقیق، نرخ وقوع خرابی ابزار به‌عنوان یکی از عوامل ایجاد هزینه در سلول رباتیک به تابع هزینه سیکل تولیدی اضافه شده است و تأثیر آن بر تعیین مدت‌زمان مناسب ماشین‌کاری بررسی شده است.

تحقیق حاضر شامل دو مدل ریاضی دو هدفه برای مدل‌سازی فعالیت‌ها در یک سلول رباتیک یک ماشینه است. در این تحقیق، فرض شده است که در هر سیکل تولیدی تنها یک قطعه تولید می‌شود و برای تولید هر قطعه تنها یک نوع ابزار مورد نیاز است. سپس طول عمر معین و غیرقطعی ابزار در دو مدل جداگانه برای تعیین زمان مناسب ماشین‌کاری در نظر گرفته شده است. تابع هدف در هر دو مدل ریاضی کمینه‌سازی هزینه و کمینه‌سازی زمان در هر سیکل تولیدی است. تفاوت این تحقیق با تحقیق‌های گذشته از دو منظر مورد توجه است. در مدل اول که طول عمر ابزار معین نامیده شده است، طول عمر ابزار تابعی از سرعت ماشین‌کاری است؛ بنابراین، با مشخص شدن سرعت ماشین‌کاری طول عمر ابزار مشخص می‌شود و ابزار در زمان‌های تعیین شده تعویض می‌شود. در این مدل، متوسط زمان موردنیاز برای تعویض ابزار در هر سیکل تولیدی که تابعی از سرعت و در نتیجه زمان ماشین‌کاری است در محاسبه زمان کل سیکل تولیدی لحاظ شده است. در مدل دوم که طول عمر ابزار غیرقطعی است، ابزار به دلایلی غیر از فرسودگی از کار می‌افتد. با توجه به آن‌که زمان از کار افتادن ابزار در این مدل نامعین است، خرابی ابزار ممکن است حین ماشین‌کاری بر روی قطعه رخ دهد و منجر به ایجاد هزینه برای قطعه یا دستگاه شود. متوسط هزینه ایجادشده در هر سیکل تولیدی ناشی از خرابی‌های ناگهانی ابزار در تابع هزینه مدل دوم در نظر گرفته شده است. سپس تأثیر تغییر نرخ خرابی ابزار در تابع هزینه و همچنین زمان بهینه ماشین‌کاری مورد بررسی قرار گرفته است. در نظر گرفتن متوسط زمان موردنیاز برای تعویض ابزار در سلول‌های رباتیک یک ماشینه با یک ابزار و همچنین در نظر گرفتن طول عمر غیرقطعی ابزار در تعیین تابع هزینه سیکل تولیدی که در این تحقیق انجام شده در ادبیات مشاهده نشده است.

لازم به ذکر است که در تحقیق‌های اندکی در حوزه ماشین‌کاری برای تعیین زمان مناسب ماشین‌کاری، اهداف هم‌زمان مدنظر قرار گرفته شده است. درحالی‌که تصمیم‌گیری در دنیای واقعی معمولاً متأثر از در نظر گرفتن چندین هدف به‌طور هم‌زمان است. این تحقیق با در نظر گرفتن هم‌زمان دو هدف کمینه‌سازی زمان و هزینه سیکل تولیدی سعی در برطرف نمودن این نیاز دنیای واقعی دارد. در ادامه، در بخش دوم از این تحقیق مروری بر تحقیق‌های مرتبط انجام شده است. در بخش سوم، به برخی از مبانی نظری تحقیق به‌طور خلاصه اشاره شده است. مدل‌سازی مسئله تحقیق با در نظر گرفتن طول عمر معین و غیرقطعی ابزار در بخش چهارم انجام شده است. روش حل مسئله و مثال عددی در بخش پنجم آمده است. در بخش ششم، تحلیل حساسیت نتایج به‌دست‌آمده انجام شده است و در پایان بحث و نتیجه‌گیری تحقیق ارائه شده است.

[1] Chuck
[2] Flash

حسن بیگی دشت بیاض و همکاران/ تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، صفحه: ۵۳۵-۵۱۸

۲- پیشینه پژوهش

تحقیق‌های مربوط به‌توالی حرکت ربات را بلاژویچ و همکاران[1] (۱۹۸۹) آغاز نمودند. تحقیق بعدی در رابطه با زمان‌بندی سلول رباتیک توسط ستی و همکاران[2] (۱۹۹۲) انجام شد. پس‌ازآن، خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در زمینه سلول رباتیک در کتاب «بهینه‌سازی توان عملیاتی در سلول‌های رباتیک» جمع‌آوری شد (داوانده و همکاران[3]، ۲۰۰۷).

کوکسالان و کها[4] (۲۰۰۳) در تحقیق خود دو مسئله حداقل زمان کار در جریان ساخت با حداقل تعداد کارهای دارای دیرکرد و حداقل زمان کار در جریان ساخت با حداکثر تحویل پیش از موعد را که هر یک از آن‌ها به‌تنهایی از نوع مسائل *NP*-سخت[5] هستند، در یک سیستم تولیدی یک ماشینه مورد بررسی قرار داده‌اند و از یک الگوریتم مبتنی بر ژنتیک برای بهبود نتایج قبلی استفاده کرده‌اند (کوکسالان و بوراک کها، ۲۰۰۳). عزیزاوقلو و همکاران[6] (۲۰۰۳) در تحقیقی دیگر مسئله یك ماشینه برای تولید قطعات یکسان و با دو هدف حداقل کردن مجموع زمان تکمیل و حداقل کردن تعداد کارهای منقطع‌شده در یك محیط زمان‌بندی مجدد را مدنظر قرار دادند. آن‌ها ثابت کردند اگرچه روش‌های ابتکاری جستجوی محلی، دست‌یابی به تمام جواب‌های مؤثر را تضمین نمی‌کند، ولی می‌تواند جواب‌های مؤثر را برای معیارهای چندگانه در زمان‌های محاسباتی قابل‌قبول تخمین بزند.

کایان و آکتورک[7] (۲۰۰۵) با هدف حداقل نمودن دو عامل زمان و هزینه، محدوده‌ای را برای مدت‌زمان لازم برای ماشین‌کاری در یک سلول رباتیک تعیین نموده‌اند. آن‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی مانند طول عمر ابزار، توان ماشین‌کاری و صافی سطح حد پایین مدت‌زمان لازم برای ماشین‌کاری را مشخص نموده‌اند. حد بالای ماشین‌کاری نیز با حداقل نمودن تابع هزینه تولید هر قطعه به دست می‌آید. در تحقیق آن‌ها فرض شده است که برای تولید هر قطعه تنها از یک ابزار استفاده می‌شود و نیاز به تعویض ابزار به علت فرسودگی نیست.

برینتراپ و همکاران[8] (۲۰۰۷) در تحقیق خود مدلی ریاضی با دو هدف حداقل کردن عدم تعادل سیستم و حداکثر کردن خروجی ارائه داده‌اند و از یك الگوریتم مبتنی بر الگوریتم ژنتیك برای حل مسئله بارگذاری ماشین با مشخص بودن زمان ماشین‌کاری و محدودیت مخزن ابزار استفاده کرده‌اند.

گولتکین و همکاران[9] (۲۰۰۸) اولین کسانی بودند که زمان‌بندی دو معیاره را با دو هدف کمینه کردن هزینه و زمان سیکل تولیدی در مسائل سلول رباتیک وارد نمودند. آن‌ها نشان دادند که تغییر چیدمان سلول رباتیک از حالت خطی به ربات-مرکز[10] باعث کاهش زمان سیکل تولیدی می‌شود. گولتکین و همکاران (۲۰۱۰) از حدود تعیین شده در تحقیق کایان و آکتورک (۲۰۰۵) استفاده کردند و با هدف کمینه کردن هم‌زمان هزینه و زمان هر سیکل تولیدی، مدت‌زمان مناسب برای هر عملیات را به دست آوردند. آن‌ها با فرض این‌که قطعات یکسانی در یک سلول رباتیک تولید می‌شود؛ برای تولید هر قطعه تنها یک عملیات مورد نیاز است و این عملیات با یک ابزار معین انجام می‌شود، مدت‌زمان عملیات را به‌عنوان متغیر تصمیم در مسئله در نظر گرفته‌اند.

دروبوچوویچ و همکاران[11] (۲۰۰۶) برای هر ماشین در سلول رباتیک علاوه بر بافر ورودی، یک بافر خروجی نیز با ظرفیت محدود قرار دادند و تأثیر آن را بر نرخ خروجی تولید بررسی نمودند. در تحقیق آن‌ها قطعات تولیدی یکسان‌اند و زمان حرکت ربات بین ماشین‌ها

---

[3] Blazewicz et.al.
[4] Sethi et.al.
[5] Dawande et al.
[1] Köksalan and Keha
[2] NP-hard
[3] Azizoglu et al.
[4] Kayan and Akturk
[5] Brintrup et al.
[6] Gultekin et al.
[7] Robot-centered
[8] Drobouchevitch et al.

جمع‌پذیر است. در تحقیقی دیگر، خاربچ و همکاران[1] (۲۰۱۱) یک روش دقیق مبتنی بر شاخه و کران برای مسئله زمان‌بندی در سلول‌های رباتیک ارائه داده‌اند.

در تحقیق چی و همکاران[2] (۲۰۱۱) فرض‌های استفاده از چند ربات در سلول رباتیک m ماشینه، برداشتن بدون وقفه قطعه از روی ماشین‌آلات و تولید دو قطعه متفاوت در هر سیکل تولیدی در نظر گرفته شده است. هدف این تحقیق یافتن حداقل زمان اتمام کارها بر اساس تعداد ربات‌های موجود در سلول است. آن‌ها برای حل این مسئله یک الگوریتم چندجمله‌ای نیز پیشنهاد نمودند.

گولتکین (۲۰۱۲) در تحقیق خود به بیان اهمیت و تأثیرگذار بودن انعطاف‌پذیری ماشین‌آلات *CNC* در زمان‌بندی یک سلول رباتیک دو ماشینه با جریان کارگاهی پرداخته است. یلدیز و همکاران[3] (۲۰۱۲) در تحقیق خود بحث مربوط به سیکل ناب را که گولتکین، کاراسان و آکتورک (۲۰۰۹) مطرح کردند برای سلول رباتیک m ماشینه تحلیل کردند. آن‌ها با توجه به این مطلب که در هر سلول رباتیک با m ماشین برای تولید قطعات یکسان $(2m-1)!$ سیکل ناب وجود دارد، حداقل زمان تولید را برای این سیکل‌ها محاسبه نمودند و دو سیکل را که زمان تولید آن‌ها از همه کمتر است به‌عنوان دو سیکل قوی‌تر معرفی نمودند.

باتور و همکاران[4] (۲۰۱۲) در تحقیق خود مسئله یافتن توالی ورود قطعات به یک سلول رباتیک دو ماشینه را برای تولید قطعات متنوع در نظر گرفتند. آن‌ها در تحقیق خود در پی یافتن توالی مناسبی برای حرکات ربات در سلول بودند به‌گونه‌ای که زمان انجام عملیات‌ها حداقل شود. این مسئله دارای پیچیدگی سخت[5] است و با استفاده از مسئله فروشنده دوره‌گرد مدل‌سازی شده است. برای حل مسئله از یک الگوریتم ابتکاری دومرحله‌ای استفاده شده است. عبدالقادر و همکاران[6] (۲۰۱۳) در تحقیق خود به بررسی استراتژی‌های مختلف حرکت ربات در یک سلول رباتیک چهار ماشینه پرداخته‌اند و از الگوریتم ژنتیک برای یافتن بهترین نحوه حرکت ربات در این سلول با هدف حداقل کردن زمان سیکل حرکتی استفاده نموده‌اند. فتحیان و همکاران[7] (۲۰۱۳) نیز مسئله تخصیص عملیات‌های متفاوت به ماشین‌ها را در یک سلول رباتیک دو ماشینه مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها از مسئله فروشنده دوره‌گرد برای مدل کردن این مسئله استفاده نموده‌اند و مسئله را با دو الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی‌تبرید حل نمودند.

در تحقیق علمی و توپالوقلو[8] (۲۰۱۷) یک الگوریتم مبتنی بر کلونی مورچگان برای حل مسئله زمان‌بندی کار کارگاهی چرخه‌ای[9] در یک سلول رباتیک چند ماشینه ارائه شده است. در این مسئله، یک ربات قطعات مختلف را بین چندین ماشین جابجا می‌کند. توالی حرکت ربات بین ماشین‌ها به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که نرخ خروجی بیشینه شود. این مسئله در مواردی که چندین محصول مختلف به‌صورت انبوه تولید می‌شوند، کاربرد دارد.

در تحقیق گولتکین و همکاران (۲۰۱۷) یک مدل ریاضی برای تعیین توالی حرکت رباتی با دو گیره بین تعداد مشخصی از ماشین‌ها ارائه شده است به‌گونه‌ای که زمان سیکل تولیدی حداقل شود. ازآنجاکه تعداد ماشین‌های استفاده‌شده در سلول‌های رباتیک به دلیل فضای زیادی که اشغال می‌کنند، معمولاً کم است؛ مدل ارائه‌شده این تحقیق برای یک مسئله دوماشینه با جزییات بیشتری بررسی شده است.

[9] Kharbeche et al.
[10] Che et al.
[1] Yildiz et al.
[2] Batur et al.
[3] NP-hard
[4] Abdulkader et al.
[5] Fathian et al.
[6] Elmi and Topaloglu
[7] Cyclic Job Shop

در تحقیق ماجومدر و همکاران[1] (۲۰۱۹) با استفاده از الگوریتم تغذیه باکتری[2] توالی بهینه قطعات و حرکات ربات در یک سلول رباتیک دوماشینه به‌گونه‌ای تعیین شده است که کمترین زمان سیکل تولیدی به دست آید. برای تنظیم پارامترها در این الگوریتم از یک الگوریتم بهینه‌سازی دوهدفه با ترکیب الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب[3] و روش آنالیز سطح پاسخ[4] استفاده شده است.

تونکه و همکاران[5] (۲۰۱۹) یک رویکرد زمان‌بندی آفلاین آنلاین را برای زمان‌بندی در سلول‌های رباتیکی که در برداشتن و گذاشتن قطعه محدودیت داشته و زمان فرآیند آن‌ها غیرقطعی است ارائه کرده‌اند که برخلاف مطالعات گذشته قادر به کنترل عدم اطمینان‌ها در تمام مراحل فرآیندهای پردازش و مدیریت ربات است. در این مطالعه فرض شده است که از یک ربات دوبازویی برای جابجایی قطعات استفاده شود.

گورل و همکاران[6] (۲۰۱۹) در تحقیق اخیر خود به بررسی مسئله انرژی مصرفی ربات در حین جابجایی پرداخته‌اند. در تحقیق آن‌ها سعی شده است تا توازنی بین زمان سیکل تولیدی و انرژی مصرفی ربات برقرار شود. در این تحقیق فرض شده است که ربات در یک مسیر خطی حرکت و قطعات یکسان را بین ماشین‌آلات جابجا می‌کند. با انجام یک مطالعه موردی برای دو سلول رباتیک، نشان داده شده است که کنترل سرعت ربات می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل‌توجهی در مصرف انرژی شود.

در تحقیق فومنی و همکاران[7] (۲۰۲۰) مسئله بهینه‌سازی جریان کارگاهی در یک سلول رباتیک دو ماشینه بررسی شده است. در این تحقیق، فرض شده است که قطعه در حرکت بین دو ماشین نیاز به بازرسی دارد. تابع هدف‌ها در این تحقیق، به‌صورت کمینه‌سازی هزینه کل و زمان سیکل تولیدی در نظر گرفته شده است. با استفاده از روش محدودیت اپسیلون مدت‌زمان مناسب انجام بازرسی تعیین شده است. در تحقیق مرادی و همکاران (۲۰۱۸) نیز با در نظر گرفتن مسئله زمان‌بندی سلول‌های رباتیک سه ماشینه، نشان داده شده است که زمان تعویض ابزار و توالی ورود قطعات در انتخاب سیاست حرکتی بهینه ربات و زمان سیکل تولیدی تأثیرگذار است.

در یکی از آخرین تحقیق‌های منتشر شده در زمینه سلول رباتیک، رضاییان و همکاران[8] (۲۰۲۱) به بررسی مسئله زمان‌بندی به هنگام با تحویل دسته‌ای و تخصیص موعد تحویل در سلول‌های رباتیک جریان کارگاهی ترکیبی پرداخته‌اند. در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، برای تعیین توالی کارها و حرکت ربات‌ها ارائه شده است. دو الگوریتم فرا ابتکاری مبتنی بر سیستم ایمنی مصنوعی و جستجوی ممنوعه برای حل مدل در این تحقیق پیشنهاد شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده است که الگوریتم سیستم ایمنی مصنوعی عملکرد خوبی برای حل این مسئله دارد.

لی و همکاران[9] (۲۰۲۱) در تحقیق خود بر مسئله شکست‌های ناگهانی ابزار و شکست ابزار در طی زمان (فرسودگی) در ماشین‌آلات *CNC* تمرکز کرده‌اند. آن‌ها برای شناسایی عوامل کاهش‌دهنده شکست ابزار به علت گذشت زمان از رویه *BBIP*[10] در *NHP*[11] استفاده نموده‌اند. همچنین، اشاره شده است که شناسایی دقیق این عوامل در کاهش نرخ شکست‌های ناگهانی ابزار و شکست به علت فرسودگی در ماشین‌آلات *CNC* می‌تواند مؤثر باشد.

علاوه بر تحقیق‌هایی که به بررسی مسئله زمان‌بندی در سلول‌های رباتیک پرداخته‌اند، تحقیق‌های زیادی در حوزه‌ی مهندسی مکانیک برای بررسی عوامل مؤثر بر عمر ابزار انجام شده است. تحقیق بادریناتان و کارونامورتی[12] (۲۰۱٤) برای بررسی تأثیر پارامترهای

---

[8] Majumder et al.
[9] Bacterial Foraging Algorithm
[10] Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II)
[11] Response Surface Methodology
[12] Tonke et al.
[13] Gürel et al.
[1] Foumani et al.
[2] Rezaeian et al.
[3] Li et al.
[4] Bounded Bathtub Intensity Process
[5] Non-homogeneous Poisson process
[6] Badrinathan and Karunamoorthy

برش‌کاری بر طول عمر ابزار ماشین‌آلات *CNC* انجام شده است. در تحقیق ژانگ و همکاران[1] (۲۰۲۰) به اهمیت بالای توجه به سایش ابزار در حین ماشین‌کاری برای کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری اشاره شده است. در این تحقیق همچنین پیش‌بینی میزان سایش ابزار در طی زمان با استفاده از روش یادگیری عمیق انجام شده است.

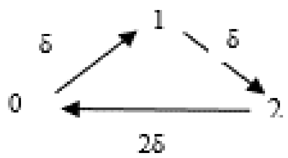
در تحقیق خوران و صفری[2] (۲۰۱۷) به بررسی میزان تأثیر اندازه ابزار و نرخ پیشروی بر عمر ابزار در فرزکاری سرعت بالای آلیاژ تیتانیوم پرداخته شده است. یانگ و همکاران[3] (۲۰۱۸) در تحقیق خود به کارایی پایین روش‌های قابلیت اطمینان قبلی برای تخمین مناسب نرخ شکست و طول عمر ابزار پرداخته‌اند و روشی را برای تخمین مناسب این مقادیر در ماشین‌های *CNC* پیشنهاد داده‌اند. مروری بر مدل‌های زمان‌بندی دو و چند هدفه در تحقیق هوگوین[4] (۲۰۰۵) دیده می‌شود.

۳- مبانی نظری تحقیق

۳-۱- سیکل تولیدی در یک سلول رباتیک

تعریف ۱: در یک سلول رباتیک یک ماشینه، فعالیت A_{ij} دلالت بر فرآیندی دارد که ربات قطعه را از مکان i به مکان j می‌برد. به این منظور، در مدت‌زمان ε، قطعه را از مکان i برداشته و در مدت‌زمان $(j-i)\delta$ آن را به سمت مکان j می‌برد. سپس در مدت‌زمان ε، قطعه را در مکان j تخلیه می‌نماید.

تنها سیکل حرکتی شدنی موجود در سلول رباتیک یک ماشینه s_1 است. طبق تعریف در این سیکل، توالی حرکت ربات از $A_{01}A_{12}$ پیروی می‌کند که مکان صفر مربوط به ناحیه ورودی، مکان یک مربوط به ماشین و مکان دو، مربوط به ناحیه خروجی است. در آغاز سیکل، ربات روبه‌روی ناحیه ورودی است (**شکل ۱**).



شکل ۱- حرکت ربات در یک سیکل تولیدی سلول رباتیک یک ماشینه

Figure 1- Robot movement in a single machine robotic cell.

فرض کنید t مدت‌زمان ماشین‌کاری یک قطعه باشد. δ مدت‌زمان لازم برای جابه‌جایی بین ورودی و ماشین یا بین ماشین و خروجی است و ε مدت‌زمان لازم برای برداشتن قطعه از روی ورودی یا ماشین و گذاشتن قطعه بر روی خروجی یا ماشین است. با این فرض که T_{s_1} مدت‌زمان لازم برای حرکت ربات در یک سیکل حرکتی است. در این صورت طبق تحقیق ستی و همکاران (۱۹۹۲)، زمان کل یک سیکل تولیدی از **رابطه (۱)** پیروی می‌کند.

$$T_{s_1}=4\delta+4\varepsilon+t. \qquad (۱)$$

رابطه (۱) نشان می‌دهد که مدت‌زمان یک سیکل تولیدی به زمان هر عملیات وابسته است؛ بنابراین برای کاهش زمان سیکل تولیدی هر قطعه و افزایش نرخ خروجی کافیست مدت‌زمان عملیات کاهش داده شود. مدت‌زمان عملیات هر ماشین *CNC* تابعی از شرایط ماشین‌کاری مانند سرعت و نرخ تغذیه است. تغییر در پارامترهای مختلف، شرایط ماشین‌کاری متفاوتی ایجاد می‌نماید، لذا مدت‌زمان عملیات نیز تغییر خواهد کرد.

---

[7] Zhang et al.
[8] Khoran and Safari
[9] Yang et al.
[10] Hoogeveen

فرض کنید $f(t)$ هزینه تولید هر قطعه را نشان دهد. میزان این هزینه می‌تواند وابسته به مدت‌زمان ماشین‌کاری، مدت‌زمان سیکل تولیدی و یا مدت‌زمان فعال بودن ماشین و ربات در سیکل تولیدی باشد. در این تحقیق هزینه کل تولید تابعی از مدت‌زمان عملیات در نظر گرفته شده است. به‌این‌ترتیب، تمامی هزینه‌ها به‌صورت تابعی از مدت‌زمان ماشین‌کاری در نظر گرفته می‌شوند.

۳-۲- تصمیم‌گیری چندهدفه

در دنیای امروز بیشتر مسائلی که برای تصمیم‌گیری به مدیران عرضه می‌شوند، دارای ابعاد متنوعی هستند و با چندین معیار فرموله می‌شوند (حسین‌زاده و همکاران[1]، ۲۰۱۸). در یک دسته از مسائل چندمعیاره که مسائل چندهدفه نامیده می‌شوند، معمولاً هدف‌ها با یکدیگر در تضادند و مسئله جواب بهینه ندارد و در نتیجه مجموعه‌ای از جواب‌های پارتو[2] یا نامغلوب[3] برای مسئله به دست می‌آید. در مسائلی که معیار بهینگی بیش از یک هدف است، جواب‌های X و Y از فضای جواب مسئله نسبت به یکدیگر دو حالت خواهند داشت، یکی بر دیگری غلبه کند یا نتوانند بر هم غالب شوند. چنانچه تمامی تابع هدف‌ها از نوع ماکزیمم‌سازی باشند به جواب X یک جواب غالب گفته می‌شود، هر گاه دو شرط ۱ و ۲ برقرار باشد.

شرط ۱- هیچ یک از مقادیر تابع‌های هدف متناظر با جواب X کمتر از مقادیر متناظر در تابع هدف برای جواب Y نباشد یعنی

$$f_i(X) \geq f_i(Y) \qquad \forall\, i=1,\dots,m.$$

شرط ۲- حداقل مقدار یکی از توابع هدف X بهتر از مقدار تابع هدف متناظر در جواب Y باشد.

چنانچه جواب قابل‌قبولی در فضای جواب مسئله یافت نشود که بر جواب X غلبه کند، آنگاه X یک جواب نامغلوب، مؤثر و یا بهینه پارتو نامیده می‌شود. یافتن این جواب‌ها برای این نوع مسائل اهمیت زیادی دارد چرا که هر یک به‌عنوان یک گزینه انتخاب برای تصمیم‌گیرنده محسوب می‌شوند (چهارسوقی و کرمانی[4]، ۲۰۰۸).

روش‌های مختلفی برای حل مسائل چندهدفه وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش وزن‌دهی، لکزیکوگرافی و محدودیت اپسیلون اشاره نمود. در این تحقیق از روش محدودیت اپسیلون برای حل مسئله چندهدفه استفاده شده است. شکل کلی تابع محدودیت اپسیلون به‌صورت شرطی است و با رابطه $\varepsilon(f|g)$ نشان داده می‌شود. این روش با در دست داشتن مقدار تابع g، مقداری برای تابع f به دست می‌آورد. با استفاده از این روش می‌توان تابع f را تابعی از g در نظر گرفت و با در نظر گرفتن حدی برای g می‌توان مقدار بهینه‌ای برای f به دست آورد (توکلی‌مقدم و همکاران[5]، ۲۰۱۶).

۴- مدل‌سازی مسئله

در این بخش، مدل‌سازی مسئله در دو حالت طول عمر معین و غیرقطعی ابزار ارائه شده است. مفروض‌های اصلی در هر دو مدل به شرح زیر است:

- *سلول رباتیک شامل یک ماشین و یک ربات جابه‌جا کننده است.*
- *در هر سیکل تولیدی تنها یک قطعه تولید می‌شود.*
- *برای تولید هر قطعه تنها یک نوع ابزار مورد نیاز است.*
- *زمان برداشتن و گذاشتن قطعه از/روی ماشین ثابت است.*

---

[1] Hosseinzadeh et al.
[2] Pareto
[3] Nondominated
[1] Chaharsooghi and Kermani
[2] Tavakkoli-Moghaddam et al.

طول عمر ابزار معین باشد:

در اقتصاد ماشین‌کاری یکی از پر استفاده‌ترین مدل‌های طول عمر ابزار، معادله طول عمر تیلور است. تیلور طی ۲۶ سال کار تجربی، معادلات متفاوتی را برای طول عمر ابزارهای گوناگون گسترش داده است که شکل عمومی آن در **رابطه (۲)** بیان شده است.

$$\frac{v}{v_r}=\left(\frac{t_r}{t_0}\right)^n. \tag{۲}$$

در این رابطه $\boldsymbol{v}$، سرعت ماشین‌کاری، t_0 طول عمر ابزار، n مقدار ثابت و t_r عمر اندازه‌گیری شده ابزار به ازای سرعت مفروض v_r است. مقدار t_r را می‌توان در مورد هر قطعه با در نظر گرفتن جنس ابزار و آهنگ پیشروی خاص با انجام آزمایش یا با استفاده از داده‌های تجربی به دست آورد. ضریب n عمدتاً به جنس ابزار بستگی دارد.

اگر در تمام مدت ماشین‌کاری، ابزار با قطعه درگیر باشد در این‌صورت تعداد ابزارهای لازم برای ماشین‌کاری N_b تا قطعه یکسان برابر $\frac{N_b t}{t_0}$ به دست می‌آید؛ که در این رابطه t مدت‌زمان ماشین‌کاری است. حال اگر تعداد ابزارهای مصرف‌شده یا سنگ زده شده برای تولید N_b قطعه برابر با N_t باشد. در این‌صورت، تعداد ابزار لازم برای تولید هر قطعه از **رابطه (۳)** به دست خواهد آمد.

$$\frac{N_t}{N_b}=\frac{t}{t_r}\left(\frac{v}{v_r}\right)^{\frac{1}{n}}. \tag{۳}$$

مدت‌زمان ماشین‌کاری هر قطعه نیز از **رابطه (٤)** به دست می‌آید.

$$t=\frac{\rho}{v}. \tag{۴}$$

که در این معادله ρ ثابتی است که مقدار آن به عملیات مورد نظر بستگی دارد. بوث‌روید و نایت[1] (۱۹۸۹) هزینه کل تولید هر قطعه را با فرض معین بودن طول عمر ابزار با **رابطه (۵)** تعریف نموده‌اند.

$$f(t)=ct+c\frac{N_t}{N_b}t_c+\frac{N_t}{N_b}c_t. \tag{۵}$$

در این معادله، c هزینه ماشین‌کاری به ازای هر واحد زمانی است، c_t هزینه ابزار و t_c مدت‌زمان لازم برای هر بار تعویض آن است. لذا قسمت اول دلالت بر هزینه ماشین‌کاری، قسمت دوم دلالت بر هزینه تعویض ابزار و قسمت سوم دلالت بر هزینه خرید ابزارهای مورد نیاز برای تولید هر قطعه دارد. با استفاده از **رابطه‌های (۳)**، **(۴)** و**(۵)** رابطه بین هزینه تولید و سرعت ماشین‌کاری در **رابطه (٦)** به دست می‌آید.

$$f(v)=c\,\frac{\rho}{v}+(ct_c+c_t)\frac{\frac{\rho}{v}}{t_r}\left(\frac{v}{v_r}\right)^{\frac{1}{n}}. \tag{۶}$$

بنابراین، ازآنجاکه طول عمر ابزار تابعی از سرعت ماشین‌کاری در نظر گرفته شده است با استفاده از روابط موجود در ادبیات تابع هزینه این تحقیق نیز بر اساس متغیر سرعت ماشین‌کاری تعریف شده است. با کمینه کردن **رابطه (٦)** می‌توان سرعت بهینه را برای به دست آوردن هزینه بهینه ماشین‌کاری تعیین کرد. حال آنکه متوسط زمان هر سیکل تولیدی نیز متأثر از سرعت ماشین‌کاری خواهد بود. برای برقراری توازنی بین دو معیار هزینه و زمان، هر دو معیار باید هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرند. با استفاده از **رابطه‌های (٤)** و **(۱)**، رابطه بین زمان سیکل در یک سلول رباتیک یک ماشینه و سرعت ماشین‌کاری به دست می‌آید که در **رابطه (۷)** بیان شده است.

$$T_{s_1}=4\delta+4\varepsilon+\frac{\rho}{v}. \tag{۷}$$

علاوه بر مدت‌زمان سیکل، زمانی نیز در هر سیکل صرف تعویض ابزارها می‌شود که به‌صورت **رابطه (۸)** تعریف می‌شود.

---

[1] Boothroyd and Knight

حسن بیگی دشت بیاض و همکاران/ تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، صفحه: ۵۳۵-۵۱۸

$$T_C = \frac{N_t}{N_b} t_c \,. \qquad (۸)$$

در این رابطه t_c مدت‌زمان مورد نیاز برای تعویض ابزارها برای تولید یک قطعه در یک سیکل تولیدی است. با استفاده از **رابطه‌های (۸)** و **(۷)** زمان کل تولید یک قطعه در یک سیکل تولیدی سلول رباتیک یک ماشینه از **رابطه (۹)** به دست می‌آید.

$$T_{s_1} = 4\delta + 4\varepsilon + \frac{\rho}{\nu} + \frac{N_t}{N_b} t_c \,. \qquad (۹)$$

از سویی دیگر سرعت ماشین‌کاری در هر ماشین CNC در بازه معینی قابل‌کنترل و تغییر است؛ یعنی:

$$v^l \le v \le v^u . \qquad (۱۰)$$

در **رابطه (۱۰)**، v^l و v^u به ترتیب حدود پایین و بالای سرعت ماشین‌کاری هستند.

با توضیحات ارائه شده چنانچه طول عمر ابزار معین باشد، سرعت بهینه ماشین‌کاری و در نتیجه مدت‌زمان بهینه برای ماشین‌کاری با استفاده از **مدل (۱)** تعیین می‌شود. پارامترها و متغیر تصمیم استفاده شده در **مدل (۱)** در ادامه معرفی شده‌اند.

پارامترها:

n: مقدار ثابت که به جنس ابزار بستگی دارد.

v_r: سرعت مفروض.

t_r: عمر اندازه‌گیری شده ابزار به ازای v_r است.

ρ : مقداری ثابت که مقدار آن به عملیات مورد نظر بستگی دارد.

c: هزینه ماشین‌کاری به ازای هر واحد زمانی.

c_t: هزینه خرید هر ابزار.

t_c: مدت‌زمان طی شده برای هر بار تعویض ابزار.

δ: مدت‌زمان لازم برای جابه‌جایی بین ورودی و ماشین یا بین ماشین و خروجی.

ε: مدت‌زمان لازم برای برداشتن قطعه از روی ورودی یا ماشین و گذاشتن قطعه بر روی خروجی یا ماشین.

v^l: حد پایین سرعت ماشین‌کاری.

v^u: حد بالای سرعت ماشین‌کاری.

متغیر تصمیم:

$\boldsymbol{v}$: سرعت ماشین‌کاری.

t: مدت‌زمان ماشین‌کاری.

رابطه (۱۱) هدف را حداقل کردن هزینه تولید هر قطعه و **رابطه (۱۲)** هدف را حداقل کردن زمان سیکل تولیدی هر قطعه بیان می‌کند. با حل این مسئله، سرعت مناسب و در نتیجه مدت‌زمان بهینه برای ماشین‌کاری (با استفاده از **رابطه (٤)**) در بازه تعیین شده به دست می‌آید.

مدل (۱):

$$min\ f(v)=C\frac{\rho}{\nu}+(Ct_c+c_t)\frac{\frac{\rho}{\nu}}{t_r}\left(\frac{v}{\nu_r}\right)^{\frac{1}{n}}, \quad (11)$$

$$min\ T_{s_1}=4\delta+4\varepsilon+\frac{\frac{\rho}{\nu}}{t_r}\left(\frac{v}{\nu_r}\right)^{\frac{1}{n}}t_c+\frac{\rho}{\nu}, \quad (12)$$

$$\text{S.T} \qquad v^l \le \nu \le v^u. \quad (13)$$

با کاهش مدت‌زمان ماشین‌کاری، نرخ خروجی افزایش می‌یابد اما در مقابل، طول عمر ابزار به علت افزایش سرعت، کاهش می‌یابد و هزینه ابزار افزایش پیدا می‌کند. در مقابل، افزایش مدت‌زمان ماشین‌کاری طبق **رابطه (۵)** منجر به افزایش هزینه‌های ماشین‌کاری می‌شود. لذا انتخاب مدت‌زمان مناسب برای برقراری توازنی بین این دو هزینه از اهمیت بالایی برخوردار است. در اقتصاد ماشین‌کاری با این فرض که طول عمر ابزار معین است، مدت‌زمان لازم برای ماشین‌کاری با هدف کاهش هزینه‌های تولیدی هر قطعه به دست می‌آید. در این تحقیق، حداقل نمودن زمان سیکل تولیدی در یک سلول رباتیک یک ماشینه برای به دست آوردن سرعت و زمان مناسب ماشین‌کاری به هدف بالا اضافه شده است تا نتایج حاصل از حل این مدل‌ها جواب مناسب‌تری را در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار دهد.

طول عمر ابزار غیرقطعی باشد:

در این تحقیق، برای بررسی اهمیت وقوع خرابی‌های ابزار که به دلایلی غیر از فرسودگی رخ می‌دهند در تعیین مدت‌زمان مناسب ماشین‌کاری، هزینه‌ی خرابی ابزار به هزینه تولید هر قطعه اضافه شده است تا مؤثر یا بی‌اهمیت بودن آن در تعیین مدت‌زمان مناسب ماشین‌کاری بررسی شود. در این صورت، هزینه قطعه تولیدی تنها شامل هزینه ماشین‌کاری و ابزار نیست.

رامالینگام و واتسون (۱۹۷۷) در تحقیق خود نشان داده‌اند که تعداد خرابی‌های مستقل از زمان در یک بازه زمانی معین دارای تابع توزیع پواسون است. اگر x نشان‌دهنده تعداد دفعات وقوع پیشامدی باشد که از تابع توزیع پواسون با پارامتر λ پیروی می‌کند، آنگاه فاصله زمانی بین وقوع هر دو اتفاق متوالی این متغیر تصادفی پواسون، دارای توزیع نمایی با تابع چگالی **رابطه (۱۴)** است.

$$f_Y(y)=\lambda e^{-\lambda y} \qquad y\ge 0. \quad (14)$$

احتمال خرابی ابزار چنانچه مستقل از زمان باشد در هر سیکل تولیدی مستقل از شماره سیکل است. در این‌صورت کافیست متوسط هزینه در سیکل اول محاسبه شود و این هزینه به‌تمامی سیکل‌های تولیدی نسبت داده شود. متوسط هزینه شکست ابزار در حین ماشین‌کاری در سیکل اول در **رابطه (۱۵)** بیان می‌شود.

$$E(CF)=C_f\int_0^{t}\lambda_f e^{-\lambda_f y}dy. \quad (15)$$

$E(CF)$ متوسط هزینه خرابی ابزار در هر سیکل تولیدی است. λ_f، پارامتر توزیع نمایی و C_f، هزینه ناشی از خرابی ابزار در هر بار خرابی است. تابع هزینه کل تولید هر قطعه در تحقیق گولتکین، آکتورک و کاراسان (۲۰۱۰) به‌صورت **رابطه (۱۶)** تعریف شده است.

$$f(t)=Ct+KUt^{\alpha}. \quad (16)$$

در این رابطه C هزینه ماشین‌کاری به ازای هر واحد زمانی، $K>0$ و $\alpha<0$ ثابت مخصوص ابزار برش مورد نیاز برای انجام عملیات و U ثابت مخصوص عملیات با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند طول و قطر برش است (گولتکین و همکاران، ۲۰۱۰). بنابراین، قسمت اول **رابطه (۱۶)** هزینه ماشین‌کاری و قسمت دوم هزینه فرسودگی ابزار به ازای هر قطعه تولیدی در هر سیکل تولیدی است (گولتکین و همکاران، ۲۰۱۰). در تحقیق حاضر، تابع هزینه کل تولید هر قطعه به‌صورت **رابطه (۱۷)** در نظر گرفته شده است. جمله سوم این رابطه، هزینه خرابی ابزار در حین عملیات است که به تابع هزینه تحقیق گولتکین و همکاران (۲۰۱۰) اضافه شده است. در این تحقیق، احتمال خرابی ابزار به‌عنوان عاملی که در مرور ادبیات وجود نداشته است مدنظر قرار گرفته است و متوسط هزینه ناشی از آن برای بررسی تأثیر این عامل در تعیین زمان مناسب ماشین‌کاری، در تابع هزینه کل سیکل تولیدی در نظر گرفته شده است.

حسن بیگی دشت بیاض و همکاران/ تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، صفحه: ۵۳۵-۵۱۸

$$f(t)=Ct+KUt^{\alpha}. \quad (۱۷)$$

کایان و آکتورک (۲۰۰۵) در تحقیق خود حدودی را برای سرعت و در نتیجه مدت‌زمان لازم برای ماشین‌کاری به دست آورده‌اند. این حدود به‌صورت $[t^l \leq t \leq t^u]$ بیان شده است. در این رابطه، t مدت‌زمان لازم برای ماشین‌کاری و t^l و t^u به ترتیب حد پایین و بالای مدت‌زمان لازم برای عملیات‌اند.

چنانچه طول عمر ابزار متأثر از دلایلی مستقل از زمان استفاده از ابزار باشد، **مدل (۲)** نتیجه مطلوبی برای انتخاب مدت‌زمان ماشین‌کاری در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد. پارامترها و متغیر تصمیم **مدل (۲)** به شرح زیر است.

پارامترها:

C_f: هزینه ناشی از خرابی/ شکست ابزار است.

λ_f: پارامتر توزیع نمایی.

C: هزینه ماشین‌کاری به ازای هر واحد زمانی.

$K>0$ و $\alpha < 0$: ثابت مخصوص ابزار برش مورد نیاز برای انجام عملیات.

U: ثابت مخصوص عملیات با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند طول و قطر برش.

t^l: حد پایین مدت‌زمان لازم برای عملیات ماشین‌کاری.

t^u: حد بالای مدت‌زمان لازم برای عملیات ماشین‌کاری.

متغیر تصمیم:

t: مدت‌زمان لازم برای عملیات ماشین‌کاری.

درصورتی‌که طول عمر ابزار غیرقطعی باشد و علت به پایان رسیدن عمر ابزار، خرابی ابزار به دلایلی مستقل از عمر طی شده ابزار باشد، با در نظر گرفتن **رابطه‌های (۱۸)** و **(۱۹)** و **رابطه (۲۰)** می‌توان مدت‌زمان بهینه ماشین‌کاری را به دست آورد. در **مدل (۲)** تابع هدف $f(t)$ نشان‌دهنده متوسط هزینه ماشین‌کاری قطعات در هر سیکل تولیدی است.

مدل (۲):

$$\min f(t) = Ct+KUt^{\alpha} + C_f\,(1-e^{-\lambda_f t}), \quad (۱۸)$$

$$\min T_{s_1} = 4\delta + 4\varepsilon + t, \quad (۱۹)$$

$$t^l \leq t \leq t^u. \quad (۲۰)$$

در **مدل‌های (۱)** و **(۲)**، هدف کمینه کردن دو تابع هزینه و زمان است. به دلیل آنکه این دو هدف با یکدیگر در تضادند، مسئله جواب بهینه ندارد و مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه پارتو برای مسئله به دست می‌آید. با استفاده از روش محدودیت اپسیلون، می‌توان تابع هزینه تولید هر قطعه را تابعی از زمان سیکل تولیدی آن قطعه در یک سلول رباتیک در نظر گرفت. در این حالت با در دست داشتن مقادیر متفاوت زمان سیکل تولیدی، هزینه تولید هر قطعه متناظر با زمان مورد نظر به دست می‌آید. برای حل هر یک از **مدل‌های (۱)** و **(۲)** با استفاده از روش محدودیت اپسیلون باید تابع‌های مورد نظر را به **رابطه‌های (۲۱)** و **(۲۲)** تبدیل نمود:

$$\min\ f(t), \quad (۲۱)$$

$$\text{subject to: Cycle time} \leq \widehat{T}, \quad (۲۲)$$

$$v^l \leq v \leq v^u \quad \text{or} \quad t^l \leq t \leq t^u. \quad (۲۳)$$

برای استفاده از روش محدودیت اپسیلون در حل **مدل (۱)**، بایستی **رابطه (۱۲)** با $4\delta+4\varepsilon+\frac{\frac{\rho}{v}}{t_r}\left(\frac{v}{v_r}\right)^{\frac{1}{n}} t_c+\frac{\rho}{v}\leq\hat{T}$ جایگزین شود. به‌طور مشابه در **مدل (۲)**، **رابطه (۱۹)** با $4\delta+4\varepsilon+\leq\hat{T}$ جایگزین می‌شود. در حل هر دو مدل، این مقادیر در **رابطه (۲۲)** قرار می‌گیرند. با قراردادن مقادیر متفاوتی برای $\hat{T}$، مجموعه‌ای از نقاط بهینه پارتو به دست می‌آید.

۵- مثال عددی

در این بخش با ارائه دو مثال عددی، کارایی مدل پیشنهادی تحقیق آزمون می‌شود. در تمامی مثال‌ها و جدول‌ها واحد پارامترها بیان نشده است. برای حل مثال‌های عددی، از نرم‌افزار *GAMS* و حل‌کننده *BARON* استفاده شده است.

مثال ۱ (مدل (۱)): با فرض $c = 0/0028$، $\rho = 192$، $t_r = 60$، $t_c = 240$، $n = 0/25$، $\delta = 3$، $v_r = 2.75$، $c_t = 2/1$، $v^l = 0/5$، $\varepsilon = 1$ و $v^u=2.5$، مدت‌زمان مناسب برای ماشین‌کاری به روش محدودیت اپسیلون و با استفاده نرم‌افزار *GAMS* در **جدول ۱** نمایش داده شده‌اند.

همانطور که در **جدول ۱** دیده می‌شود، مدت‌زمان ماشین‌کاری بین ردیف دو و سه ۲۱/۰۵ واحد کاهش یافته در نتیجه آن هزینه تولید ۰/۰۱۶۵ واحد افزایش یافته است، این در حالی است که در ردیف هفت و هشت به‌ازای کاهش ۲/۲۷ واحدی در مدت‌زمان ماشین‌کاری، هزینه‌ای معادل با ۰/۰۱۵۷ واحد به سیستم تحمیل می‌شود. با اینکه انتظار می‌رود کاهش‌های یکسان در مدت‌زمان ماشین‌کاری، هزینه‌های یکسانی را به سیستم تحمیل کند ولی نتایج نشان می‌دهد در سرعت‌های پایین‌تر کاهش بیشتری در زمان عملیات منجر به افزایش هزینه خواهد شد. به عبارتی دیگر در سرعت‌های پایین‌تر نرخ افزایش هزینه در هر واحد زمانی کمتر است.

جدول ۱- نقاط پارتو مثال ۱.

Table 1. Pareto points of example 1.

f(t)*	t*	v*	$\hat{T}_{s_1}$	ردیف
0.6914	185.15	1.037	276.7	1
0.6914	185.15	1.037	219	2
0.7079	164.1	1. 17	201.06	3
0.7251	156.35	1.228	197.2	4
0.7449	150.12	1.279	194.2	5
0.8	138.83	1.385	190.3	6
0.8390	133.33	1.44	189.4	7
0.8547	131.06	1.465	189.28	8

مثال ۲ (مدل (۲)): با فرض $c = 0/5$، $K = 4$، $U = 5/93$، $\alpha = -1/49$، $C_f = 0/4$، $\lambda_f = 0/0024$، $\delta = 3$، $\varepsilon = 1$ و $t^l = 0/5$ و $t^u =$ 5/526، مدت‌زمان مناسب برای ماشین‌کاری به روش محدودیت اپسیلون و با استفاده نرم‌افزار *GAMS* در **جدول ۲** نمایش داده شده‌اند.

جدول ۲- نقاط پارتو مثال ۲.

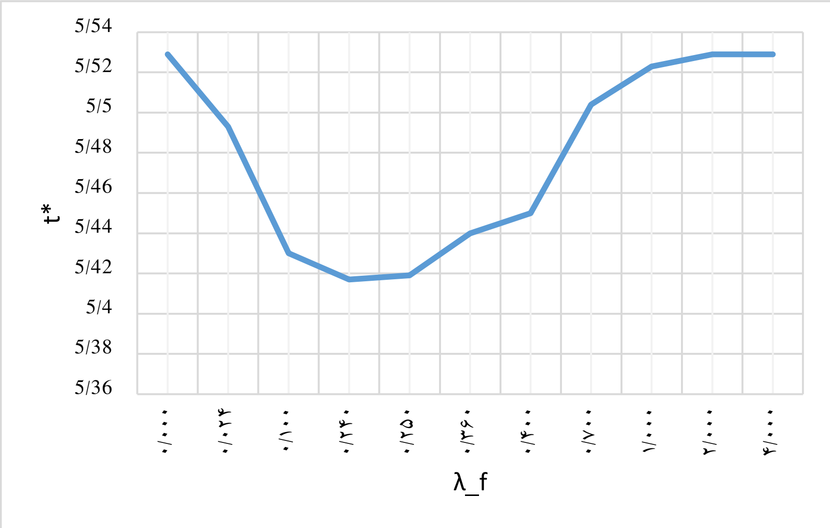
Table 2- Pareto points of example 2.

f(t)*	t*	$\hat{T}_{s_1}$	ردیف
Na	Na	16	1
24.221	1	17	2
18.6875	1.2	17.1	3
11.61	1.7	17.7	4
7.3084	2.5	18.5	5
5.01	4	20	6
4.7768	4.3955	20.5	7
4.668	5	21	8
4.6257	5.526	21.526	9
4.6257	5.526	24.6	10

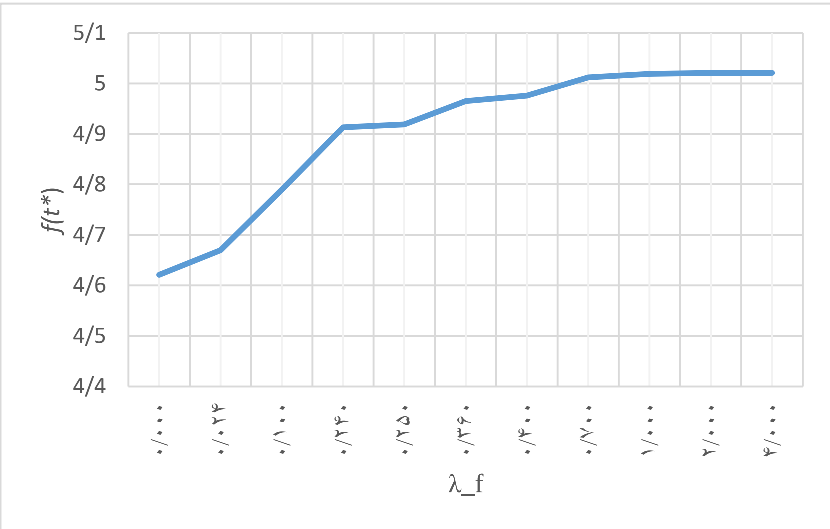
همانطور که در **جدول ۲** دیده می‌شود، مدت‌زمان یک سیکل تولیدی در ردیف‌های سه و چهار به اندازه ۰/۵ واحد زمانی اختلاف دارند که منجر به اختلاف ۷/۰۷ واحد پولی در هزینه شده است؛ اما اختلاف ۰/۵ واحد زمانی در ردیف‌های هشت و نه منجر به اختلاف هزینه ۰/۰۴۳ واحد پولی شده است. در این حالت نیز با افزایش سرعت (کاهش زمان سیکل تولیدی)، نرخ افزایش هزینه‌ها در هر واحد زمان بیشتر می‌شود.

۶- تحلیل حساسیت نتایج به‌دست‌آمده

در این بخش، تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامتر تابع توزیع طول عمر ابزار و تأثیر آن بر مدت‌زمان ماشین‌کاری و تابع هزینه تولید انجام شده است. **شکل ۲** ارتباط بین نرخ وقوع خرابی ابزار و مدت‌زمان بهینه ماشین‌کاری را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است، توجه به نرخ وقوع خرابی ابزار در انتخاب زمان مناسب برای ماشین‌کاری اهمیت دارد.



شکل ۲- تحلیل حساسیت زمان بهینه ماشین‌کاری در مثال ۲ در صورت تغییر نرخ وقوع خرابی ابزار.
Figure 2- Sensitivity analysis of the optimal machining time in example 2 if the tool failure rate changes.

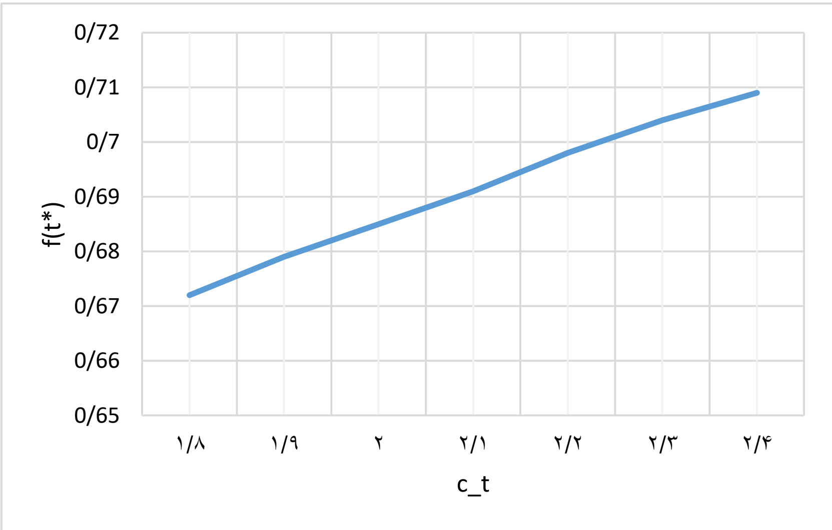


شکل ۳- تحلیل حساسیت تابع هزینه در مثال ۲ در صورت تغییر نرخ وقوع خرابی ابزار.
Figure 3- Sensitivity analysis of the cost function in example 2 if the tool failure rate changes.

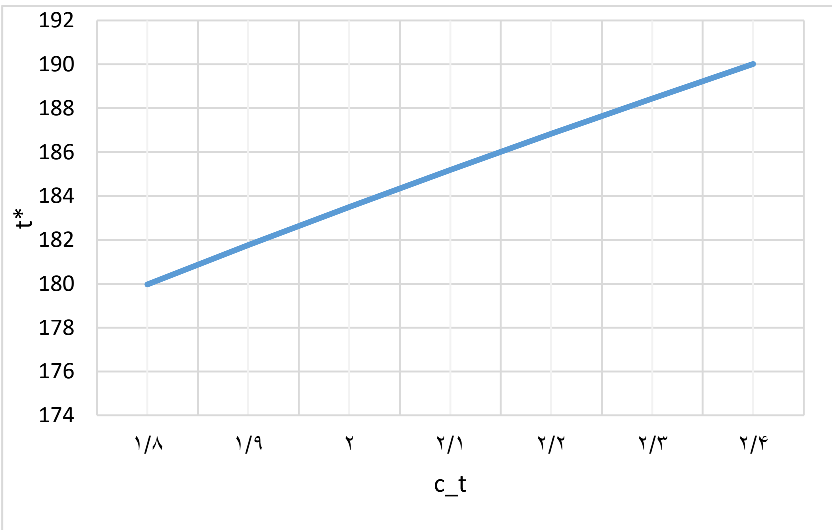
همانطور که در **شکل ۲** مشخص است و در **رابطه (۱۸)** نیز آمده است، رابطه بین زمان بهینه ماشین‌کاری و نرخ وقوع شکست‌های ناگهانی ابزار غیرخطی است. در بازه $\lambda_f > 0.25$ هرچه نرخ وقوع شکست بیشتر می‌شود، زمان بهینه ماشین‌کاری بیشتر و سرعت بهینه کمتر می‌شود. در بازه $\lambda_f < 0.25$ هر چه نرخ شکست بیشتر می‌شود، زمان بهینه ماشین‌کاری کمتر و سرعت بهینه بیشتر می‌شود.

ارتباط بین نرخ وقوع خرابی ابزار و هزینه بهینه سیکل تولیدی در **شکل ۳** نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است با افزایش نرخ وقوع خرابی ابزار هزینه بهینه سیکل تولیدی نیز افزایش می‌یابد.

در ادامه، برای اعتبارسنجی مدل پیشنهادی تحقیق تحلیل حساسیت برای برخی از پارامترهای مسئله انجام شده است. ارتباط بین هزینه خرید هر ابزار و هزینه بهینه هر سیکل تولیدی و زمان بهینه ماشین‌کاری به ترتیب در **شکل‌های ۴** و **۵** نشان داده شده است. همانطور که در **شکل ۴** مشخص است با افزایش هزینه خرید هر ابزار تابع هزینه کل نیز به‌صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. همانطور که در **شکل ۵** نشان داده شده است با افزایش هزینه خرید ابزار زمان بهینه ماشین‌کاری نیز افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر با افزایش قیمت ابزار سرعت ماشین‌کاری کاهش می‌یابد تا طول عمر ابزار افزایش یابد و در نتیجه تعداد دفعات تعویض ابزار و در نتیجه هزینه کل سیکل تولیدی کاهش یابد.



شکل ۴- تحلیل حساسیت مقدار بهینه هزینه سیکل تولیدی با تغییر هزینه خرید هر ابزار.
Figure 4- Sensitivity analysis of the optimal cycle cost by changing the purchase cost of each tool.



شکل ۵- تحلیل حساسیت زمان بهینه ماشین‌کاری با تغییر هزینه خرید هر ابزار.

Figure 5- Sensitivity analysis of the optimal machining time by changing the purchase cost of each tool.

۷- بحث و نتیجه‌گیری

تولید محصول در کمترین زمان و با کمترین هزینه ممکن همواره یکی از مهم‌ترین هدف‌های مدیران واحدهای تولیدی است. با استفاده از سلول‌های تولیدی انعطاف‌پذیر می‌توان محصولاتی با کیفیت و متنوع را در زمانی کم تولید کرد. با توجه به هزینه‌های بالای استقرار این‌گونه سیستم‌های تولیدی، این سیستم‌ها باید به‌درستی مدیریت شوند تا علاوه بر حداکثر سازی نرخ تولید، هزینه تولید برای هر قطعه نیز حداقل شود. تحقیق حاضر شامل دو مدل ریاضی دو هدفه برای مدلسازی فعالیت‌ها در یک سلول رباتیک شامل یک ماشین و یک ربات جابه‌جا کننده قطعات است. در این تحقیق، طول عمر معین و غیرقطعی ابزار در دو مدل جداگانه برای محاسبه هزینه سیکل تولیدی و زمان مناسب ماشین‌کاری در نظر گرفته شده است. در مدل اول که طول عمر ابزار معین و تابعی از سرعت ماشین‌کاری در نظر گرفته شده است؛ با استفاده از روابط موجود در ادبیات، تابع هزینه سیکل تولیدی بر اساس سرعت ماشین‌کاری به‌دست‌آمده است. با مشخص شدن سرعت مناسب ماشین‌کاری، طول عمر ابزار نیز مشخص و ابزار در زمان‌های تعیین‌شده تعویض می‌گردد؛ بنابراین، متوسط زمان هر سیکل تولیدی نیز متأثر از سرعت ماشین‌کاری خواهد بود. در این تحقیق، متوسط زمان موردنیاز برای تعویض ابزار در هر سیکل تولیدی که تابعی از سرعت و در نتیجه زمان ماشین‌کاری است در محاسبه زمان کل سیکل تولیدی لحاظ شده است. در مدل دوم که طول عمر ابزار غیرقطعی است، خرابی ابزار به دلایلی غیر از فرسودگی ابزار رخ می‌دهد و متوسط هزینه ایجادشده در هر سیکل تولیدی ناشی از خرابی‌های ناگهانی ابزار در تابع هزینه در نظر گرفته شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که توجه به نرخ خرابی ابزار در تعیین زمان مناسب ماشین‌کاری اهمیت دارد.

همانطور که در مثال‌های این تحقیق نشان داده شد، کاهش مدت‌زمان عملیات در سرعت‌های متفاوت لزوماً افزایش هزینه یکسانی را به سیستم تحمیل نمی‌کند؛ بنابراین باید در انتخاب مدت‌زمان مناسب ماشین‌کاری برای ابزارها و قطعه‌های متفاوت دقت بیشتری نمود. در بسیاری از تولیدها از قبیل تولیدهایی که هزینه تهیه ابزار در آن‌ها نسبتاً بالاست، تعیین زمان مناسب ماشین‌کاری بدون توجه به طول عمر ابزار و هزینه‌های ناشی از خرابی و فرسودگی ابزار در حین ماشین‌کاری منطقی نیست. در این تحقیق، هزینه خرابی ابزار به دلایلی مستقل از عمر طی شده ابزار در محاسبه تابع هزینه در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که نرخ وقوع خرابی ابزار می‌تواند در انتخاب مدت‌زمان مناسب ماشین‌کاری مؤثر باشد. دلیل این امر می‌تواند حساسیت ابزارها به ضربه در پی وجود ایرادهایی در شکل هندسی و ساختار مکانیکی قطعات اولیه باشد. چنانچه احتمال ایجاد چنین خرابی‌هایی کاهش یابد، طول عمر ابزار بهبود می‌یابد و هزینه‌های سیکل تولیدی نیز کاهش می‌یابد. در مقابل، روشن است که کاهش نرخ خرابی ابزار هزینه‌های دیگری را در پی خواهد داشت. با تحلیل مدل ریاضی ارائه شده در این تحقیق می‌توان مشخص کرد که هزینه نسبی کدام یک از این موارد اقتصادی‌تر خواهد بود و یا تا چه میزان می‌توان برای کاهش نرخ خرابی ابزارها هزینه کرد.

یکی از مسائل بسیار مهم دیگر که برنامه‌ریزان و مدیران تولید باید در نظر داشته باشند توجه به اهمیت اهداف مختلف و رتبه‌بندی آن‌ها است. گاهی کاهش در هزینه‌ها بسیار مهم‌تر از کاهش در زمان تولید یک قطعه است. ممکن است تولیدکنندگان مایل باشند تا با افزایش در زمان تولید، هزینه‌ها را به میزان اندکی کاهش دهند. در این حالت می‌توان وزن نسبی هر یک از تابع هدف‌ها را به‌عنوان ورودی در مدل چندهدفه در نظر گرفت و جواب بهینه مسئله یک هدفه به‌دست‌آمده را به دست آورد. توسعه مدل ریاضی پیشنهادی این تحقیق برای مدل‌سازی زمان و هزینه سیکل تولیدی در سلول‌های رباتیک چندماشینه و همچنین در نظر گرفتن طول عمر غیرقطعی ابزار ناشی از فرسودگی برای این مسائل برای انجام تحقیق‌های آینده پیشنهاد می‌شوند.

منابع

Abdulkader, M. M. S., ElBeheiry, M. M., Afia, N. H., & El-Kharbotly, A. K. (2013). Scheduling and sequencing in four machines robotic cell: application of genetic algorithm and enumeration techniques. *Ain Shams engineering journal*, *4*(3), 465-474.

Azizoglu, M., Kondakci, S., & Köksalan, M. (2003). Single machine scheduling with maximum earliness and number tardy. *Computers & industrial engineering*, *45*(2), 257-268.

Badrinathan, K. S., & Karunamoorthy, L. (2014). Reducing tool wear in CNC end milling operation using progressive feed rate. *Applied mechanics and materials*, 592, 716-723.

Batur, G. D., Karasan, O. E., & Akturk, M. S. (2012). Multiple part-type scheduling in flexible robotic cells. *International journal of production economics*, *135*(2), 726-740.

Boothroyd, G., & Knight, W.A. (1989). *Fundamentals of machining and machine tools*. New York: Marcel Dekker.

Brintrup, A. M., Ramsden, J., & Tiwari, A. (2007). An interactive genetic algorithm-based framework for handling qualitative criteria in design optimization. *Computers in industry*, *58*(3), 279-291.

Blazewicz, J., Sethi, S. P., & Sriskandarajah, C. (1989). *Scheduling of robot moves and parts in a robotic cell* (pp. 281-286). École des hautes études commerciales, Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions.

Chaharsooghi, S. K., & Kermani, A. H. M. (2008). An effective ant colony optimization algorithm (ACO) for multi-objective resource allocation problem (MORAP). *Applied mathematics and computation*, *200*(1), 167-177.

Che, A., Hu, H., Chabrol, M., & Gourgand, M. (2011). A polynomial algorithm for multi-robot 2-cyclic scheduling in a no-wait robotic cell. *Computers & operations research*, *38*(9), 1275-1285.

Dawande, M. W., Geismar, H. N., Sethi, S. P., & Sriskandarajah, C. (2007). *Throughput optimization in robotic cells* (Vol. 101). Springer Science & Business Media.

Drobouchevitch, I. G., Sethi, S. P., & Sriskandarajah, C. (2006). Scheduling dual gripper robotic cell: one-unit cycles. *European journal of operational research*, *171*(2), 598-631.

Elmi, A., & Topaloglu, S. (2017). Cyclic job shops robotic cell scheduling problem: ant colony optimization. *Computers & industrial engineering*, *111*, 417-432.

Fathian, M., Kamalabadi, I. N., Heydari, M., Farughi, H., & Naseri, F. (2013). Applying metaheuristic algorithms for output rate analysis in two-machine robotic manufacturing cells. *International journal of advanced robotic systems*, *10*(3), 169. https://doi.org/10.5772/56051

Foumani, M., Razeghi, A., & Smith-Miles, K. (2020). Stochastic optimization of two-machine flow shop robotic cells with controllable inspection times: from theory toward practice. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, *61*, 101822. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101822

Gultekin, H., Akturk, M. S., & Karasan, O. E. (2008). Bicriteria robotic cell scheduling. *Journal of scheduling*, *11*(6), 457-473.

Gultekin, H., Akturk, M. S., & Karasan, O. E. (2010). Bicriteria robotic operation allocation in a flexible manufacturing cell. *Computers & operations research*, *37*(4), 779-789.

Gultekin, H., Dalgıç, Ö. O., & Akturk, M. S. (2017). Pure cycles in two-machine dual-gripper robotic cells. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, *48*, 121-131.

Gultekin, H. (2012). Scheduling in flowshops with flexible operations: throughput optimization and benefits of flexibility. *International journal of production economics*, *140*(2), 900-911.

Gürel, S., Gultekin, H., & Akhlaghi, V. E. (2019). Energy conscious scheduling of a material handling robot in a manufacturing cell. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, *58*, 97-108.

Hoogeveen, H. (2005). Multicriteria scheduling. *European journal of operational research*, *167*(3), 592-623.

Hosseinzadeh, M., Mehrgan, M., Aghaei Meibodi, L., & Abbasian, E. (2018). Developing stochastic additive utility method (UTA) considering the possible dependency among criteria. *Industrial management journal*, *10*(4), 503-524.

Kayan, R. K., & Akturk, M. S. (2005). A new bounding mechanism for the CNC machine scheduling problems with controllable processing times. *European journal of operational research*, *167*(3), 624-643.

Kharbeche, M., Carlier, J., Haouari, M., & Moukrim, A. (2011). Exact methods for the robotic cell problem. *Flexible services and manufacturing journal*, *23*(2), 242-261.

Khoran, M., & Safari, H. (2017). An investigation of effects of tool size and feed rate on tool life in high-speed milling of Ti-6Al-4V alloy. *Modares mechanical engineering*, *16*(12), 21-26.

Khorasani, N., & Esmaelian, M. (2018). Integrating process planning and scheduling taking into account multiple objective using constraint planning. *Industrial management journal*, *10*(4), 677-698.

Köksalan, M., & Keha, A. B. (2003). Using genetic algorithms for single-machine bicriteria scheduling problems. *European journal of operational research*, *145*(3), 543-556.

Li, Y., Zhang, X., Ran, Y., & Zhang, G. (2021). Early failure modeling and analysis of CNC machine tools. *The international journal of advanced manufacturing technology*, *112*(9), 2731-2754.

Majumder, A., Laha, D., & Suganthan, P. N. (2019). Bacterial foraging optimization algorithm in robotic cells with sequence-dependent setup times. *Knowledge-based systems*, *172*, 104-122.

Moradi, V., Yousefi Nejad Attari, M., & Farughi, H. (2018). Modeling for minimizing cycle time in a three-machine robotic cell with assumption of tool switching. *Journal of industrial engineering research in production systems*, *6*(12), 1-17. (**In Persian**). DOI: 10.22084/IER.2017.12669.1578

Ramalingam, S., & Watson, J. (1977). Tool-life distributions part 1: single-injur toollife model. *Journal of engineering for industry*, *99*(3), 519-522.

Rezaeian, J., Derakhshan, N., Mahdavi, I., & Alizadeh Foroutan, R. (2021). Due date assignment and JIT scheduling problem in blocking hybrid flow shop robotic cells with multiple robots and batch delivery cost. *International journal of industrial mathematics*, *13*(2), 145-162.

Sethi, S. P., Sriskandarajah, C., Sorger, G., Blazewicz, J., & Kubiak, W. (1992). Sequencing of parts and robot moves in a robotic cell. *International journal of flexible manufacturing systems*, *4*(3), 331-358.

Tavakkoli-Moghaddam, R., Masoudi, S., & Eghbali, H. (2016). Solving a new mathematical model for a multi-objective and multi-depot vehicle routing problem by a non-dominated sorting Genetic algorithm. *Journal of industrial engineering research in production systems*, *3*(6), 167-175.

Taylor, F. W. (1907). On the art of metal cutting. *Trans. ASME*, *28*, 31-35.

Tonke, D., Grunow, M., & Akkerman, R. (2019). Robotic-cell scheduling with pick-up constraints and uncertain processing times. *IISE transactions*, *51*(11), 1217-1235.

Yang, Z., Zhu, D., Chen, C., Tian, H., Guo, J., & Li, S. (2018). Reliability modelling of CNC machine tools based on the improved maximum likelihood estimation method. *Mathematical problems in engineering*, *2018*. https://doi.org/10.1155/2018/4260508

Yildiz, S., Karasan, O. E., & Akturk, M. S. (2012). An analysis of cyclic scheduling problems in robot centered cells. *Computers & operations research*, *39*(6), 1290-1299.

Zhang, X., Han, C., Luo, M., & Zhang, D. (2020). Tool wear monitoring for complex part milling based on deep learning. *Applied sciences*, *10*(19), 6916. https://doi.org/10.3390/app10196916